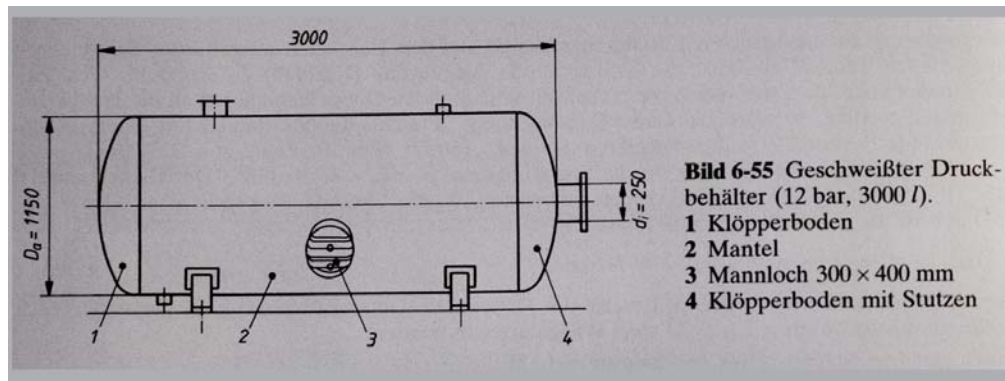


# Schweißverbindungen: Rechenbeispiel.

Es soll ein geschweißter Druckbehälter für 3000 Liter Inhalt bei 12 bar Betriebsdruck ausgelegt werden. Die höchste Temperatur des Beschickungsmittels beträgt 50°C. Die Behälterwand ist unbeheizt. Den Aufbau des Druckbehälters und die Hauptmaße zeigt Bild 1. Für alle druckbeanspruchten Teile ist der Werkstoff S235 JR G2 vorgesehen.



Zu berechnen bzw. prüfen sind:

- die Werkstoffwahl
- die erforderliche Wanddicke des Behältermantels bei verringertem Prüfaufwand für die Schweißnähte,
- die erforderliche Wanddicke des gewölbten Vollbodens in Klöpferform,
- die erforderliche Wanddicke des gewölbten Bodens in Klöpferform mit Stützenschnitt  $d_i=250$  mm im Krepfenbereich, also außerhalb  $0,6D_a$  (dafür gilt  $\beta=1,9+0,933 \cdot z/\sqrt{y}$ , mit  $z=d_i/D_a$ ),
- die Verstärkung des Mannloch-Ausschnittes 300 x 400 mm durch ein eingeschweißten Hochkantring 90x15.
- die Sicherheit des Mantels und der Böden bei der Wasserdruckprüfung.

## Lösung a)

### Die Werkstoffwahl:

Zuerst müssen wir prüfen ob der von uns vorgesehene unlegierte Baustahl für den Bau eines Behälters mit unseren Abmaßen und in der vorgegebenen Druckklasse geeignet ist. Um die Güteeigenschaften des Materials überprüfen zu können, muss der Hersteller ein 3.1B Abnahmeprüfzeugnis bereitstellen.

Vorgehensweise: Wir schauen im Roloff Matek Tabellenbuch auf **TB 6-15 (Seite 84)** ob das gewählte Material über die nötigen Festigkeitskennwerte verfügt. Dort finden wir bei unlegierten Stählen unter der Spalte **Anwendungsgrenzen** die Formel  $[D_i \cdot p \leq 20000]$ .

$D_i \cdot p$  = Innendurchmesser multipliziert mit dem zu erwarteten Druck ergibt,

$1150(\text{mm}) \cdot 12(\text{bar}) = 13800$ ;  $13800 < 20000$  also zulässig das Material.

Ergebnis zu a): Der gewählte Baustahl S235 JR G2 mit dem dazugehörigem 3.1B Zeugnis darf uns als Behälterwerkstoff dienen.

**Lösung b)****Die erforderliche Wanddicke des Behältermantels soll rechnerisch ermittelt werden.**

Für den Geschweißten zylindrischen Behältermantel wird die erforderliche Wanddicke mit der dafür vorgesehen Gleichung aus der RM Kapitel 6 Gl. (6.30a) ermittelt.

$$t = \frac{D_a * p_e}{2 \frac{K}{S} v + p_e} + c_1 + c_2$$

**t** = Bauteildicke in mm,

**D<sub>a</sub>** = äußerer Manteldurchmesser in mm

**p<sub>e</sub>** = höchstzulässiger Betriebsdruck in N/mm<sup>2</sup>

**K** = Festigkeitskennwert der Behälterwerkstoffe in N/mm<sup>2</sup>

**S** = Sicherheitsbeiwert für Druckbehälter (ohne Einheit)

**v** = Faktor zur Berücksichtigung der Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung der Schweißnaht ( Druckbehälter)

**c<sub>1</sub>** = Zuschlag zur Berücksichtigung von Wanddickenunterschreitungen bei Druckbehältern in mm

**c<sub>2</sub>** = Abnutzungszuschlag zur Wanddicke bei Druckbehältern in mm (*hierzu bitte dringend in der Formelsammlung auf Seite 52 nachschauen. Erforderlich ob die Zuschläge nötig sind oder nicht*)

**β** = Berechnungsbeiwert für gewölbte Böden (ohne Einheit)

**t<sub>e</sub>** = Ausgeführte Wanddicke bei Druckbehältern

Die Formelzeichenbenennung entnehmen wir der RM Formelsammlung (Kapitel 6)

Außendurchmesser gehen wir von 1150mm aus und Betriebsdruck wurde mit **12bar=1,2N/mm<sup>2</sup>** angegeben.

Kommen wir nun zu den Festigkeitskennwert K, diesen ermitteln wir aus der **TB 6-15 RM** Tabellenbuch. Hier wird **235 N/mm<sup>2</sup>** bis einer Behältertemperatur von **50°C** vorgeschlagen. Als Beispiel: zwischen 51°C und 120°C würde dieser Wert auf 187 N/mm<sup>2</sup> sinken.

Den Sicherheitsbeiwert **S** entnehmen wir **TB 6-17** auf Seite 85 für Walz- und Schmiedestähle wird dieser hier mit **1,5** angegeben. Ausnutzungsfaktor **v** wird üblicherweise mit **“1”** angegeben, bei verringerten Prüfaufwand mit **0,85**, bei nahtlosen Bauteilen auch mit **1**.

Zuschlag zur Berücksichtigung der zulässigen Wanddickenunterschreitung **c<sub>1</sub>** bei ferritischen Stählen nach der Maßnorm, siehe **TB1-7 RM Tabellen**.

Abnutzungszuschlag der Wanddicke **c<sub>2</sub>** wird bei ferritischen Stählen oder mit starker Korrosionsgefährdung mit **1** angegeben. Bei nichtrostenden Stählen, NE-Metallen geschützten Stählen wie z.B. durch Gummierung oder anderweitige Beschichtung oder Wandstärken über 30mm wird dieser Wert mit **0** angegeben.

$$t = \frac{1150mm * 1,2N/mm^2}{2 * \frac{235N/mm^2}{1,5} * 0,85 + 1,2N/mm^2} + 0,4mm + 1,0mm = 5,2mm + 1,4mm = 6,6mm$$

Daraus ergibt sich eine benötigte Wanddicke von 6,6mm entsprechend 7mm.

**Lösung c)****Nun soll die erforderliche Wanddicke des Klöpperbodens rechnerisch ermittelt werden**

Der gewölbte Boden soll einteilig (ungeschweißt) in Klöpperform ausgeführt werden. Die erforderliche Wanddicke der Krempe soll durch folgende Gleichung ermittelt werden. RM Kapitel 6 (Gl. 6.31)

$$t = \frac{D_a * p_e * \beta}{4 \frac{K}{S} * \vartheta} + c_1 + c_2$$

Unbekannte, welche ermittelt werden möchte.

Die Wanddicke des Klöpperbodens kann nur iterativ (Iteration: einer Lösung schrittweise annähern) ermittelt werden, weil der Berechnungsbeiwert  $\beta$  bereits von  $t_e$  abhängig ist. Diese Beiwerte können wir der RM Formelsammlung Kapitel 6 (Nr64) entnehmen.

Böden in Klöpperform;  $\beta = 1,9 + \frac{0,0325}{y^{0,7}} + y$

für Vollböden und Böden mit ausreichend verstärkten Ausschnitten im Scheitelpunktbereich  $0,6 * D_a$  gilt:

$$y = \frac{t_e - c_1 - c_2}{D_a}$$

Daraus ergibt sich für uns folgender Rechenweg. In der Gleichung (6.31)

$$t = \frac{D_a * p_e * \beta}{4 \frac{K}{S} * \vartheta} + c_1 + c_2$$

taucht der Berechnungsbeiwert  $\beta$  auf. Um diesen zu ermitteln steht uns folgende Gleichung zur Verfügung,  $\beta = 1,9 + \frac{0,0325}{y^{0,7}} + y$  hier wiederum taucht der Faktor  $y$  unbekannter Weise auf, diesen können wir mit der Gleichung  $y = \frac{t_e - c_1 - c_2}{D_a}$  ermitteln. Hier wiederum erscheint der Faktor  $t_e$  (ausgeführte Wanddicke bei Druckbehältern). Zur Bestimmung des Berechnungsbeiwertes muss von uns zunächst ein Wert angenommen werden. Da der Boden im Krempebereich ungünstiger beansprucht wird als der Mantel, wird  $t_e$  mit 9mm bestimmt.

Also fangen wir mit  $y$  an.

$$y = \frac{t_e - c_1 - c_2}{D_a}, \quad y = \frac{9mm - 0,5mm - 1,0mm}{1150mm} = 0,00652$$

Laut AD 2000 Merkblatt müssen wir mit  $y$  zwischen 0,001 und 0,1 liegen.  $0,001 < 0,00652 < 0,1$ . Also sind wir mit unserem  $y$  auf der sicheren Seite, und können jetzt  $\beta$  damit ermitteln.

$$\beta = 1,9 + \frac{0,0325}{y^{0,7}} + y, \quad \beta = 1,9 + \frac{0,0325}{0,00652^{0,7}} + 0,00652 = 3,0078$$

mit dem Faktor "  $\nu = 1,0$  für einteilige und geschweißte Böden in üblicher Ausführung" sollten wir denn jetzt alle benötigten Werte beisammen haben.

$$t = \frac{D_a \cdot p_e \cdot \beta}{4 \cdot \frac{K}{S} \cdot \nu} + c_1 + c_2, \quad t = \frac{1150 \text{ mm} \cdot 1,2 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot 3,0}{4 \cdot \frac{235 \text{ N/mm}^2}{1,5} \cdot 1,0} + 0,5 \text{ mm} + 1,0 \text{ mm} = \underline{8,1 \text{ mm}}$$

8,1mm ist unsere errechnete Wanddicke. Da diese Stärke im Handel schlecht zu bekommen ist entscheiden wir uns hier für 9mm. Wenn man diesen Boden zweiteilig fertigen würde (also Krepenteil und Kalottenteil zusammenschweißen Abb. siehe RM Kapitel 6 Bild6-49c), könnte man mit der RM Kapitel 6 Gl. (6.30b) den Kalottenteil extra bemessen. In diesem Fall würden wir hier auf ein Ergebnis von 5,9mm kommen.

### Lösung d)

Die erforderliche Wanddicke des Klöpperbodens mit Stutzenausschnitt außerhalb  $0,6D_a$  also im Krepfenbereich.

Die Wanddickenberechnung des Klöpperbodens mit Stutzen (4 in der Grafik nicht richtig dargestellt) erfolgt grundsätzlich wie im vorangehenden Beispiel c). Da der Boden durch den Stutzenausschnitt geschwächt ist und somit höher beansprucht wird, müssen wir hier einen anderen Wert für  $\beta$  ermitteln. Diese Werte können auch aus dem AD Regelwerk abgelesen werden. Wir wollen diese Werte aber rechnerisch ermitteln.

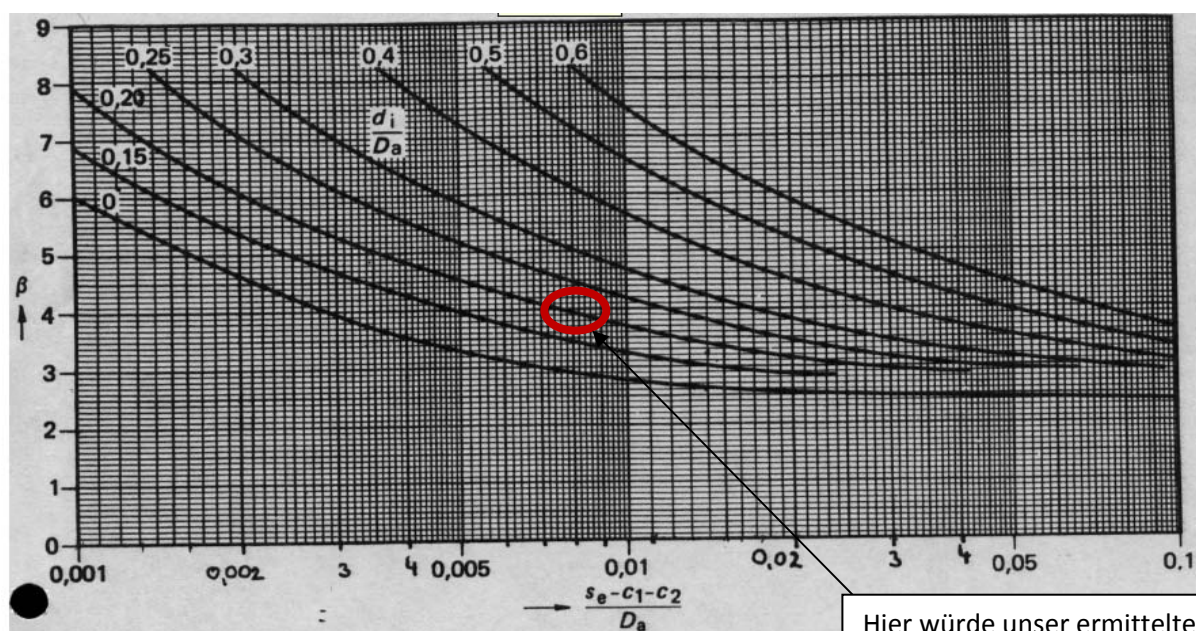


Bild 7. Berechnungsbeiwerte  $\beta$  für gewölbte Böden in Klöpperform

Hier würde unser ermittelter Wert ca. liegen

Aufgrund der höheren Belastung wählen wir als  $t_e$  einfach mal „11mm“.

$$y = \frac{t_e - c_1 - c_2}{D_a}, \quad y = \frac{11\text{mm} - 0,5\text{mm} - 1,0\text{mm}}{1150\text{mm}} = \underline{0,00826}$$

$$z = \frac{d_i}{D_a}, \quad z = \frac{250\text{mm}}{1150\text{mm}} = \underline{0,2174} \quad \text{Die Gleichung entnehmen wir dem AD2000 Regelwerk B3}$$

Bei Klöpperböden mit Ausschnitten im **Krempenbereich (außerhalb  $0,6 D_a$ )** gilt für den Berechnungswert

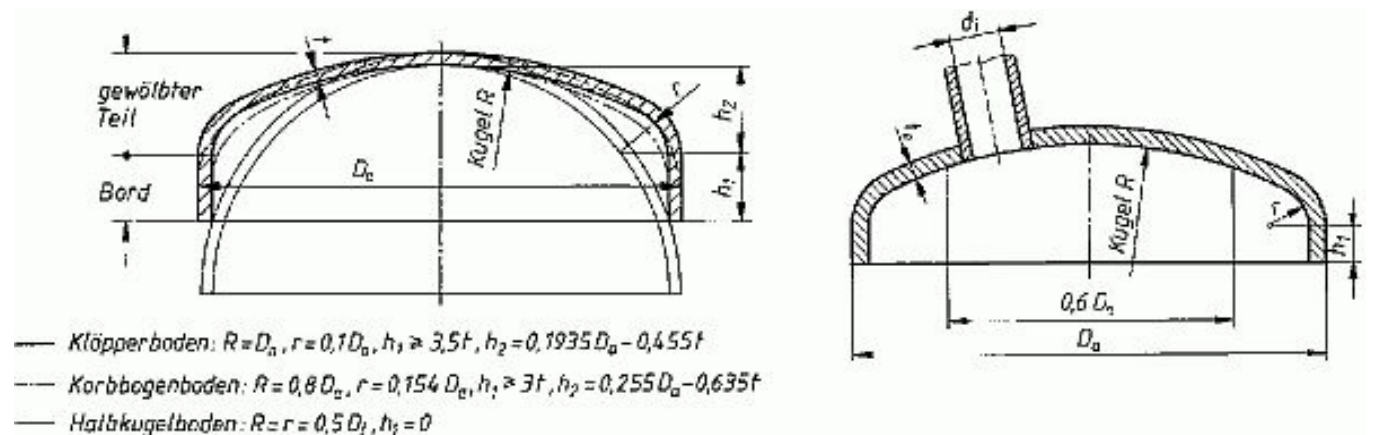
$$\beta = 1,9 + \frac{0,933 \cdot z}{\sqrt{y}}, \quad \text{somit ergibt sich: } \beta = 1,9 + \frac{0,933 \cdot 0,2174}{\sqrt{0,00826}} = \underline{4,13}$$

Mit diesen Werten können wir nun wieder unsere Gleichung für erforderliche Wanddicken im Klöpperboden aufstellen.

$$t = \frac{1150\text{mm} \cdot 1,2 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot 4,13}{4 \cdot \frac{235 \text{ N/mm}^2}{1,5} \cdot 1,0} + 0,5\text{mm} + 1,0\text{mm} = \underline{10,6\text{mm}}$$

Unsere vorgewählte Wandstärke mit 11mm war also zutreffend und somit können wir den Klöpperboden mit 11mm Wandstärke ausführen.

Diese Gleichung gilt nur für Stutzen im Krempenbereich des Klöpperbodens. Da der Krempenbereich wesentlich höher beansprucht wird, sind bei genauer Berechnung diese Regeln zu berücksichtigen. (siehe, AD-2000 Regelwerk Merkblatt B3)







Jetzt benötigen wir noch Die druckprojizierende Fläche  $A_p$ . Diese ergibt sich aus:

$$A_p = (80\text{mm} + 15\text{mm} - 1,4\text{mm} + 300\text{mm}/2) * 1136\text{mm}/2 = \underline{138364,8\text{mm}^2}$$

Damit ergibt sich:

$$\sigma_v = p_e \left( \frac{A_p}{A_\sigma} + \frac{1}{2} \right) \leq \frac{K}{S}, \quad \sigma_v = 1,2\text{N/mm}^2 \left( \frac{138364,8\text{mm}^2}{1672\text{mm}^2} + \frac{1}{2} \right) \leq \frac{235\text{N/mm}^2}{1,5} =$$

$$\sigma_v = 99,90\text{ N/mm}^2 \leq 156,7\text{ N/mm}^2$$

Der Mannloch – Ausschnitt ist durch den eingeschweißten Hochkantring weit ausreichend verstärkt, da  $\sigma_v = 99,90\text{N/mm}^2 \leq 156,7\text{ N/mm}^2$ .

### Lösung f)

Hier ist zu ermitteln ob die Beaufschlagung mit dem Prüfdruck ( $=1,3p_e$ ) zulässig ist.

Hier soll jetzt geprüft werden ob der Behälter auch den 1,3fachen Prüfdruck standhält. Hierzu müssen wir unsere Gleichung nach S umstellen.

$$t = \frac{D_a * p_e}{2 \frac{K}{S} v + p_e} + c_1 + c_2$$

$$S = \frac{2 * K * V}{\frac{D_a * p_e * 1,3}{t_e - c_1 - c_2} - p_e * 1,3}$$

$$S = \frac{2 * 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 0,85}{\frac{1150\text{mm} * 1,3 * 1,2\text{N/mm}^2}{7\text{mm} - 0,4\text{mm} - 1,0\text{mm}} - 1,3 * 1,2\text{N/mm}^2} = 1,25$$

Laut RM Tab 6-17 muss der Behälter beim Prüfen mit  $1,3p_e$  eine Sicherheit von 1,05 aufweisen. Da liegen wir mit unseren 1,25 deutlich drüber. Bei den Klöpperböden müsste man auch so verfahren aber dass sparen wir uns jetzt hier.